

К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ЛАЗЕРНО-ГИБРИДНОЙ СВАРКЕ

При лазерно-гибридной сварке стали толщиной 18 мм основной проблемой являются трещины, которые часто проявляются в центре сварного шва. Для их устранения необходимо обеспечить направленность кристаллизации путем численного моделирования процесса лазерно-гибридной сварки с различными формами лазерного луча. Исследуемыми факторами являются температурный цикл сварки, скорости охлаждения в различных точках сварного шва и склонность к образованию трещин.

Сделав оценку скоростей охлаждения в различных точках сварного шва и полей температур можно сделать выводы об обеспечении принципа направленности кристаллизации. Если при прямоугольной форме сечения сварного шва затвердевание идет от краев к центру шва, что не позволяет образовавшейся при усадке трещине получать новые порции жидкого металла для ее заполнения, то при кинжальной форме с расширением в верхней части низ сварочной ванны затвердевает в первую очередь и двигает фронт кристаллизации вверх, тем самым выдавливая дефекты из середины шва в верхнюю часть, которая при лазерно-гибридной сварке выполняется дугой и полностью переплавляется.

Численным моделированием процесса лазерно-гибридной сварки получены значения скоростей охлаждения и полей температур при различных формах лазерного луча, что позволило установить склонность к образованию трещин и рекомендовать оптимальный режим лазерно-гибридной сварки.

Ключевые слова: трещины, лазерно-гибридная сварка, трещиноустойчивость.

М. А. Ivanov

TO THE ISSUE OF CRACK FORMATION IN LASER-HYBRID WELDING

While the laser-hybrid welding of steel with a thickness of 18 mm, the main problems are the cracks, which often appear in the centre of the weld seam. To solve the problem it is necessary to provide orientation of the crystallization by numerical simulation of the process of laser-hybrid welding with various forms of the laser beam. The studied factors are the temperature cycle of the welding, the cooling rate at different points of the weld seam and the propensity for cracks formation.

Having the estimation of cooling rates at different points of the weld seam and temperature fields, it is possible to conclude about enforcing the principle of orientation of crystallization. In

conditions of a rectangular-shaped cross-section of the weld seam, the solidification goes from the edges to the center of the seam, which prevents the resulting shrinkage crack to get the new batch of molten metal for filling. In conditions of a pointed form with the extension in the upper part, the bottom of the weld pool solidifies firstly and moves the crystallization front up, thereby squeezing out the crack from the middle of the seam to the upper part, which is produced by the arc while the laser-hybrid welding and completely melted.

With the help of the numerical simulation of laser-hybrid welding there were obtained the values of cooling rates and temperature fields in the various forms of the laser beam, what allowed to establish the propensity for cracks formation and to recommend the optimum mode of laser-hybrid welding.

Keywords: crack, laser-hybrid welding, crack resistance.

При лазерно-гибридной сварке (ЛГС) стали толщиной 18 мм основной проблемой являются трещины, которые часто проявляются в центре сварного шва. Согласно нормативной документации трещины в сварном соединении не допустимы, поэтому проблема устранения трещин при лазерно-гибридной сварке является актуальной задачей. Механизм образования трещин описан различными авторами [1–4]. Он включает в себя совместное решение тепловой, механической и гидравлической задач. В данной работе вопросы гидродинамического перемешивания металла шва не рассматриваются. Акцент сделан на решении тепловой и механической задач.

Лазерно-гибридная сварка ведется в одну сварочную ванну. При этом следует различать сварку вперед дугой и дугой за лазером.

Использование сварочной дуги совместно с лазером необходимо для сварки больших толщин (свыше 18 мм) и высокой скорости сварки, когда требуемая для проплавления мощность лазерного луча существенно возрастает, что увеличивает зону термического влияния (ЗТВ) лазерной части сварного шва. Расширение ЗТВ способствует более длительному существованию жидкой прослойки, которая является причиной образования дефектов в лазерной части сварного шва. Использование сварочной дуги позволяет, за счет разделки кромок, снизить толщину металла, которую необходимо сварить лазерным лучом, а также снизить скорости охлаждения металла шва и его твердость, которая при использовании только лазерного луча получается слишком высокая, что часто не соответствует техническим требованиям для изделия.

Форма жидкой прослойки лазерной части сварного шва имеет большое влияние на направленность кристаллизации (НК). Известно, что в случае отсутствия направленности кристаллизации образуются изолированные тепловые узлы, которые концентрируют в себе различные дефекты, такие как поры, неметаллические включения, трещины. Представляется перспективным обеспечение направленности кристаллизации путем корректировки формы лазерного луча и изменения мощности сварочной дуги.

Для моделирования лазерно-гибридной сварки используем программный комплекс ESI SYSWELD. Проведем сварку стыкового шва без разделки на стальных пластинах из стали 20 толщиной 22 мм. Определим погонную энергию лазерного луча постоянной, а фокусное расстояние будем изменять путем задания формы лазерного луча в верхней и нижней частях сварного шва. Погонная энергия сварочной дуги будет изменяться в 1,5 раза от 271.5 до 405.75 Дж/мм. Также проведем проверку необходимости введения дуги до лазера или после него путем задания задержки включения дуги на временной шкале. Расстояние между сварочной дугой и лазером составит не более 3,3 мм. План эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1

План исследования

№	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Скорость сварки, м/мин	2											
Мощность лазера, Дж/мм	800											
Мощность сварочной дуги, Дж/мм	270	406	270	406	270	406	270	406	270	406	270	406
Время задержки дуги относительно лазера, с	0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1
Диаметр лазерного пучка в верхней части, мм	1	1	1	1	1	1	1	1	1,3	1,3	1,3	1,3
Диаметр лазерного пучка в нижней части, мм	1,3	1,3	1,3	1,3	1	1	1	1	1	1	1	1

Коэффициент формы провара определим по формуле:

$$\Psi = \frac{b}{h}, \quad (1)$$

где b, h – ширина и высота сварного шва.

Схема определения термических циклов и коэффициента формы провара для лазерной части сварного шва представлены на рис. 1. Результаты моделирования приведены в таблице 2.

Сделав оценку скоростей охлаждения в различных точках сварного шва и полей температур можно сделать выводы об обеспечении принципа направленности кристаллизации. Если при прямоугольной форме сечения сварного шва затвердевание идет от краев к центру шва, что не позволяет образовавшейся при усадке полости получать новые порции жидкого металла для ее заполнения, то при кинжальной форме с расширением в верхней части низ сварочной ванны затвердевает в первую очередь и двигает фронт кристаллизации вверх, тем самым выдавливая дефектную зону из середины шва в верхнюю часть, которая при лазерно-гибридной сварке выполняется дугой и полностью переплавляется.

Для оценки технологии лазерно-гибридной сварки в части вероятности образования трещин и уровня остаточных напряжений при различных режимах сварки необходимо на основе тепловых полей построить поля напряжений и деформаций.

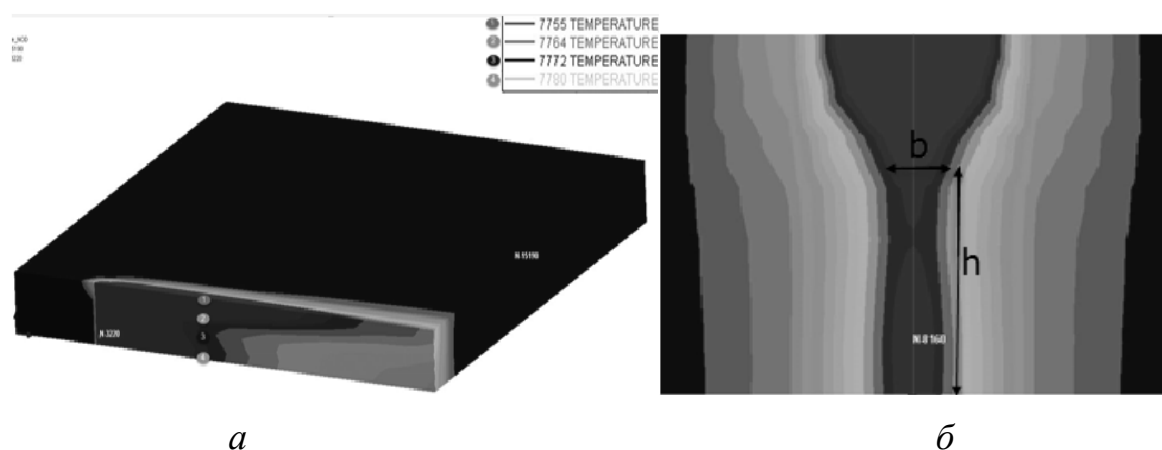
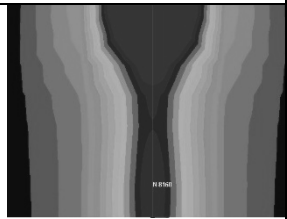
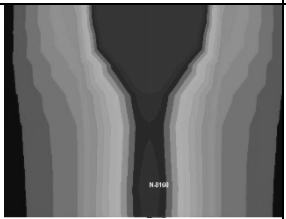
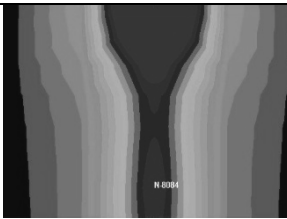







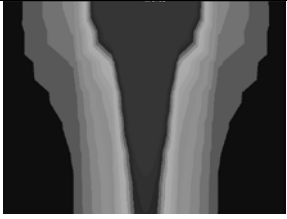



Рис. 1 Схема определения термических циклов (а) и коэффициента формы провара лазерной части сварного шва (б)

Результаты расчета теплового поля (ТП) и Ψ

No	01	02	03	04
ТП				
Ψ	0.3	0.35	0.26	0.36
No	05	06	07	08
ТП				
Ψ	0.39	0.4	0.4	0.44
No	09	10	11	12
ТП				
Ψ	0.41	0.42	0.41	0.43

При охлаждении металл уменьшает свои линейные размеры, что приводит к росту напряжений. В тоже время при высокой температуре за счет релаксации идет уменьшение напряжений. Однако релаксация зависит от свойств материала и при превышении уровня напряжений при определенной температуре сверх кривой релаксации возможно образование трещины. Условием образования трещин с позиции статической теории прочности является следующее неравенство:

$$\sigma(t) \geq \sigma_v(t), \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ – температурная зависимость напряжений в сварном шве, МПа; $\sigma_v(t)$ – временное сопротивление разрыву, МПа.

При охлаждении жидкой фазы в сварном шве возникают напряжения за счет усадки жидкого металла при жестко закрепленных краях, перепада

температур, коробления конструкции (уравнение (3)). Напряжения, возникающие в сварном шве при высокой температуре снижаются за счет релаксации. Уровень релаксации зависит от пластичности стали и ее способности снижать напряжения за счет пластической деформации.

$$\sigma(t) = \sigma^0(t)m(t), \quad (3)$$

где $\sigma^0(t)$ – напряжения релаксации, возникающие при усадке жидкого металла и зависящие от свойств стали, МПа; $m(t)$ – коэффициент локализации деформации, зависящий от неравномерности деформации в конструкции, МПа.

Для проверки неравенства (2) необходимо построить две кривых: релаксации и предела прочности от температуры.

Для построения кривой релаксации использовали комплекс *Gleeble System 3800*. Для этого образец нагрели до температуры 1300 °С в свободном состоянии, после чего начали охлаждать со скоростью 24 °С/с в заземленном состоянии. В следствие затрудненной усадки возникают напряжения. Данный график (рис. 2) учитывает релаксацию и представляет собой минимальный уровень остаточных напряжений в образце. На релаксацию также влияет темп деформации, который определяется скоростью охлаждения металла.

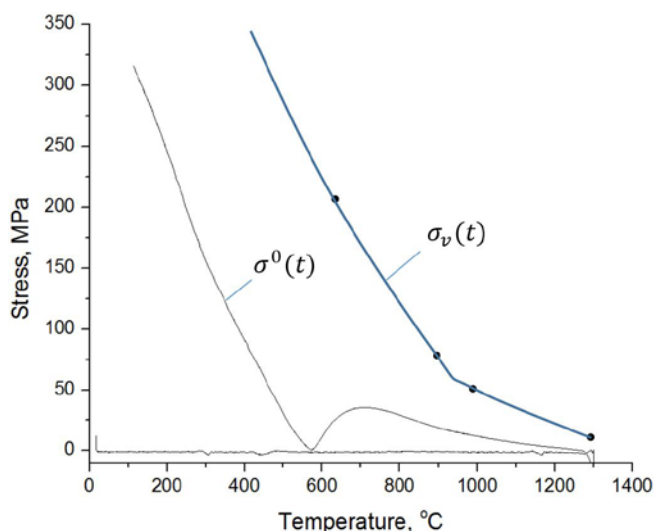


Рис. 2. График релаксации стали при скорости охлаждения 24 °С/с

В статье [4] автор получил уравнение, связывающее уровень напряжений в участке сварного шва со скоростью охлаждения:

$$\sigma^0(t) = abK(1 - n)(t_{\text{н.у.}} - t)^3 \cdot \tau^{-1}, \quad (4)$$

где α – коэффициент усадки, $1/^\circ\text{C}$; b – коэффициент модуля упругости, $\text{МПа}/^\circ\text{C}$; K – коэффициент пропорциональности, характеризующий релаксационную способность сплава, $\text{с}/^\circ\text{C}$; n – коэффициент, характеризующий уровень торможения усадки сварного шва, доли ед.; $t_{\text{н.у.}}$ – температура начала усадки, $^\circ\text{C}$; t – текущая температура, $^\circ\text{C}$; τ – продолжительность охлаждения сварного шва от температуры начала усадки до текущей температуры, с.

Для определения условий предотвращения трещин введем показатели трещиностойчивости сплава T_a^σ и сварного шва T_w^σ , которые определяют условия для отсутствия трещин в сплаве и сварном шве:

$$T_a^\sigma = \frac{\sigma_v(t)}{\sigma^\circ(t)} \geq 1, \quad (5)$$

$$T_w^\sigma = \frac{\sigma_v(t)}{\sigma(t)} \geq 1. \quad (6)$$

Напряжения в сварном шве $\sigma(t)$ зависят от конструктивной прочности и связаны с коэффициентом локализации деформации, поэтому решая совместно выражения (1, 5, 6), получим

$$T_w^\sigma = T_a^\sigma \cdot \frac{1}{m(t)} \geq 1. \quad (7)$$

В связи с тем, что кривая $\sigma_v(t)$ на рис. 2 не пересекает кривую $\sigma^\circ(t)$ во всем диапазоне температур, означает, что трещиностойчивость сплава по уравнению (5) всегда больше единицы.

Для оценки конструктивной прочности и коэффициента локализации деформации $m(t)$ необходимо получить, на основании тепловых полей и термических циклов, поля напряжений.

На рис. 3, а, представлены первые главные напряжения в центре сварного шва на расстоянии 9 мм от верхней поверхности пластины. Именно в этой зоне часто наблюдаются дефекты и трещины. Первые главные напряжения действуют вдоль сварного шва и не являются характерными при образовании трещин. А вторые главные напряжений (рис. 3, б) действуют поперек сварного шва, растягивая ванну металла совместно с усадкой. Именно вторые главные напряжения являются основными при образовании трещин.

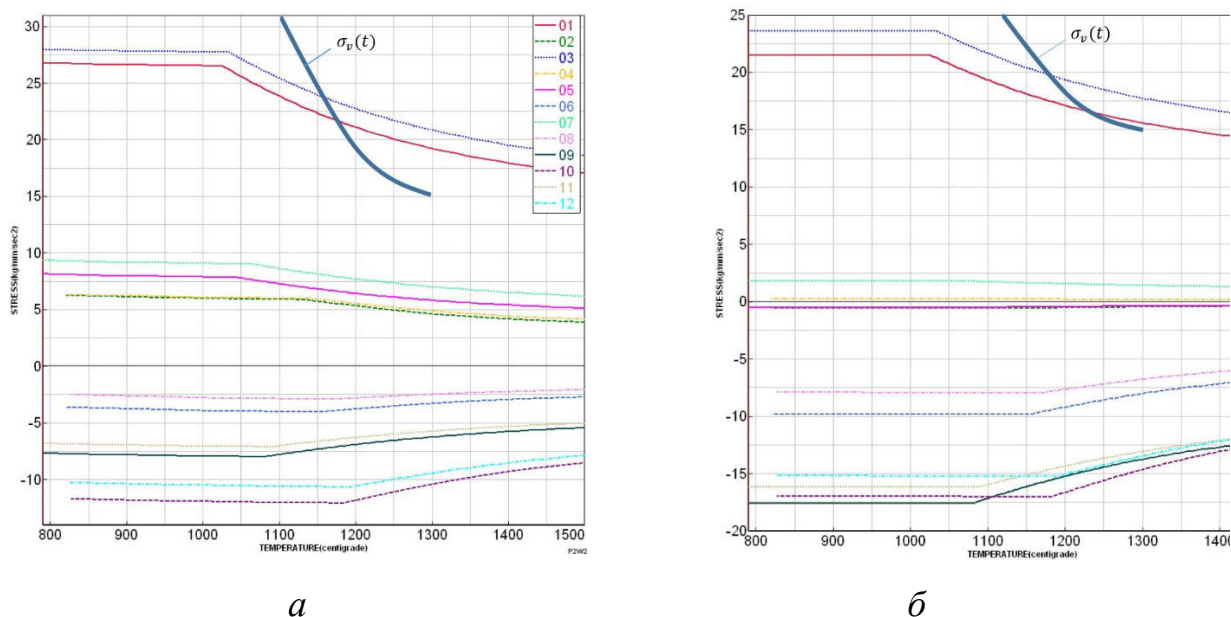


Рис. 3. Первые (а) и вторые (б) главные напряжения в центре сварного шва

На рис. 3, а дополнительно построена часть кривой предела прочности из рис. 2. Хорошо видно, что для вариантов 01 и 03 напряжения $\sigma(t)$ превышают предел прочности на разрыв $\sigma_v(t)$ в интервале температур свыше 1150 °С. В остальных случаях опасности образования трещин нет. Вторые главные напряжения превышают предел прочности для вариантов 01, 03 в интервале температур сверх 1150 °С.

Установлено, что варианты режимов сварки 01, 02, 03, 04 не удовлетворяют условиям направленности кристаллизации. В то же время при режимах лазерно-гибридной сварки 01, 03 вероятно образование трещин в центре сварного шва.

Рекомендуется вносить энергию лазерного луча в большей степени в верхнюю часть сварного шва, образуя v-образную сварочную ванну. Установлено, что при коэффициенте провара Ψ менее 0,4 лазерной части лазерно-гибридного сварного шва невозможно обеспечить направленность кристаллизации.

Экспериментами на *Gleeble System 3800* установлено, что трещиностойкость стали 20 больше единицы во всем интервале температур. Таким образом, локализация деформации в виде неравномерного остывания, воздействия условий закреплений существенно влияет на образование трещин в сварном соединении.

Список литературы

1. Либовиц Г. Разрушение. Vol. 3. – М. : Мир, 1976. – 800 с.
2. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. – М. : Наука, 1966. – 299 с.
3. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. Том 2. Внутренние напряжения и деформации. – М. : Металлургия. – 1976. – 599 с.
4. Развитие теории трещиностойкости отливок / М. А. Иванов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». Вып. 17. – 2011. – № 36. – С. 48–50.